

ЭПТ 2015



ACED 2015

УДК 621.311

5.4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА РЕВЕРСИВНОЙ ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ

MATHEMATICAL MODELING OF SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF REVERSIBLE ROLLING STAND

Маклаков Александр Сергеевич, аспирант каф. «Мехатроники» Южно-Уральского государственного университета (НИУ), Россия, 455051, г. Магнитогорск, ул. Жукова 6 - 323. E-mail: maklakov.work@gmail.com. Тел.: +79525229824

Маклакова Екатерина Андреевна, аспирант каф. «Мехатроники» Южно-Уральского государственного университета, Россия, 455051, г. Магнитогорск, ул. Юбилейная 133. E-mail: karyakina-katya@yandex.ru. Тел.: +79512447506

Гасияров Вадим Рашитович, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. «Мехатроника» Южно-Уральского государственного университета, Россия, 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76. E-mail: gasiyarovvr@gmail.com. Тел.: +79068503892

Alexander S. Maklakov, postgraduate student of South Ural State University (National Research), 455051, Magnitogorsk, 6 - 323 Zhukov, Russia. E-mail: maklakov.work@gmail.com. Ph.: +79525229824

Ekaterina A. Maklakova, postgraduate student of South Ural State University (National Research), 455051, Magnitogorsk, 133 Jubileinaia, Russia. E-mail: karyakina-katya@yandex.ru. Ph.: +79512447506

Vadim R. Gasiyarov, Cand. Sc., South Ural State University, 454080, Lenin Avenue, 76, Chelyabinsk, Russia. E-mail: gasiyarovvr@gmail.com. Ph.: +79068503892

Аннотация: Данная статья посвящена разработке математической модели синхронного электропривода реверсивной прокатной клетки применительно к одноклетьевым толстолистовым станам горячей прокатки. Представлена математическая модель электромеханической системы главного электропривода прокатной клетки. Достоверное математическое описание главного электропривода позволяет анализировать ударные приложения нагрузки на электромеханическую систему клетки при прокатке слабов из труднодеформируемых марок стали. Модель рекомендуется для анализа динамических режимов электроприводов реверсивных прокатных клеток при обработке управляющих и возмущающих воздействий.

Abstract: This article addresses the development of a mathematical model of a synchronous electric drive of a reversible rolling stand. There is the mathematical model of the electromechanical system of main electric drive of rolling mill in the article. The mathematical model allows one to analyze a shock loading on the mechanical system of rolling stand. The mathematical model is recommended to research shock and control dynamic conditions of synchronous electric drives.

Ключевые слова: математическое моделирование; электромеханическая система; синхронный электропривод; динамические режимы.

Key words: mathematical modeling; electromechanical system; synchronous electric drive; dynamic processes.

ВВЕДЕНИЕ

На различных прокатных станах при прокатке полос в клетях возникают ударные нагрузки при захвате полосы валками. Динамические удары являются основной причиной повреждения электромеханического оборудования целого мехатронного комплекса, появления дефектов на рабочей поверхности прокатных валков. Это приводит к повышенному износу рабочих и опорных валков, выходу из строя электрического

и гидравлического оборудования, различным авариям и увеличению концевой обрезки металла, которая появляется в связи с длительными переходными процессами при захвате полосы валками. Все это приводит к увеличению бракованного проката, снижению производительности стана, удорожанию продукции и т. д. [1]. Аварийные простои листопркатных станов из-за поломок шпиндельных соединений составляют 12-15% от общего числа простоев вследствие выхода из

строю механического оборудования [2]. Поломки элементов шарниров (вкладышей, пальцев, лопастей и вилок) составляют в целом незначительную часть от числа отказов по износу рабочих поверхностей, однако они, как правило, вызывают довольно длительные простои станов [3]. Основопологающими причинами, определяющими уровень ударных нагрузок в период захвата металла валками, являются скорость прокатки, температура и форма переднего конца полосы, биения момента сил упругости и угловые зазоры в сочленениях. Исследования динамических нагрузок при прокатке толстых полос на одноклетьевых станах горячей прокатки показали [4, 5], что при захвате полосы труднодеформируемых марок стали горизонтальными валками возникают ударные нагрузки, при которых динамический момент, развиваемый главным электроприводом, может превышать установившийся момент прокатки в 1,5-2 раза.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для исследования динамических режимов синхронного электропривода реверсивной прокатной клетки необходимо разработать математическую модель электромеханической системы. Математическая модель должна служить в качестве инструмента диагностики и анализа ожидаемых динамических режимов электромеханической системы в зависимости от момента на валу и скорости двигателя. Исследования провести методом математического моделирования в среде Matlab/Simulink.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА РЕВЕРСИВНОЙ ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ

А. Математическое описание синхронного электродвигателя

В настоящее время горизонтальные валки прокатной клетки проектируются с индивидуальным синхронным электроприводом. Каждый рабочий валок соединяется с двигателем через универсальный шпиндель и передает усилие прокатки и мощность привода непосредственно на прокатываемый материал. В большинстве случаев питание СД осуществляется с помощью рекуперативных двухзвенных преобразователей частоты. Для обеспечения двухзонного регулирования скорости обмотка возбуждения СД получает питание от тиристорного преобразователя [6, 7].

Математическое описание СД построено на основе системы уравнений Парка – Горева в системе отсчета d–q по следующим выражениям [8]:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + p \cdot \psi_{sd} - \omega_{0.эл} \cdot \psi_{sq}; \\ u_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + p \cdot \psi_{sq} + \omega_{0.эл} \cdot \psi_{sd}; \\ u_{rd} = R_f \cdot i_f + p \cdot \psi_f; \\ \psi_{sd} = L_{sd} \cdot i_{sd} + M_{df} \cdot i_f; \\ \psi_{sq} = L_{sq} \cdot i_{sq}; \\ \psi_f = L_f \cdot i_f + M_{df} \cdot i_{sd}; \end{cases} \quad (1)$$

где u_{sd} , u_{sq} , u_f – напряжения обмотки статора по осям d–q и напряжение обмотки ротора; R_s , R_f – сопротивления фазы обмотки статора и обмотки возбуждения; i_{sd} , i_{sq} , i_f – токи обмотки статора по осям d–q и ток обмотки возбуждения; $\omega_{0.эл}$ – скорость вращения системы координат d–q в электрическом пространстве; ψ_{sd} , ψ_{sq} , ψ_f – потокосцепления обмоток статора по осям d–q и потокосцепление обмотки возбуждения; p – оператор Лапласа; L_{sd} , L_{sq} , L_f – индуктивности обмоток статора по осям d–q и полная индуктивность обмотки возбуждения; M_{df} – коэффициент взаимной индукции между обмоткой возбуждения и обмоткой статора по оси d.

В. Математическое описание системы управления синхронным двигателем

При проектировании системы автоматического регулирования (САР) скорости (момента) необходимо оптимально использовать габаритную мощность СД. Для этого требуется обеспечить работу СД с номинальным потокосцеплением статора во всем диапазоне изменения нагрузок и регулирования скорости (за исключением режима ослабления поля при двухзонном регулировании) и с коэффициентом мощности равным (или близким) к единице. Выполняя эти условия, вектор основного потокосцепления ψ_f на векторной диаграмме СД на рис. 1 поддерживается на неизменном заданном уровне и ортогонален вектору тока якоря i_s .

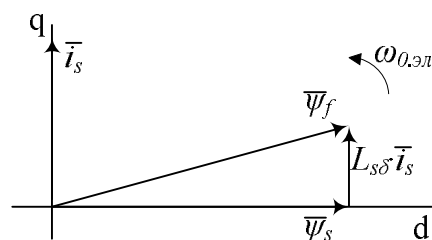


Рис. 1. Векторная диаграмма синхронного двигателя

При выполнении выше описанных условий, вектор основного потокосцепления ψ_f при изменении нагрузки скользит по окружности и всегда ортогонален вектору тока i_s [9]. Электромагнитный момент СД определяется следующим выражением:

$$M = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot \bar{\psi}_s \cdot \bar{i}_s. \quad (2)$$

где Z_p – число пар полюсов.

Из векторной диаграммы на рис. 1 и выражения (2) выводятся зависимости для управления СД. Эти зависимости реализуются блоками нелинейности БН1, БН2, БН3 по следующему выражениям:

$$\text{БН1: } i_{sq} = \frac{\sqrt{A}}{\psi_s \cdot \sqrt{1 + A \cdot \frac{L_{sq}^2}{\psi_s^2}}}, \quad (3)$$

$$\text{БН2: } i_{sd} = \frac{L_{sq} \cdot A}{\psi_s \cdot \sqrt{1 + A \cdot \frac{L_{sq}^2}{\psi_s^2}}}, \quad (4)$$

$$\text{БН3: } \psi_f = \frac{\left[L_f \cdot I_{0f} + \frac{L_{sd} \cdot L_{sq} \cdot A}{(M_{df} / L_f) \cdot \psi_s} \right]}{\sqrt{1 + A \cdot \frac{L_{sq}^2}{\psi_s^2}}}. \quad (5)$$

где I_{0f} – ток возбуждения холостого хода, ψ_s – потокосцепление статора; $A = \frac{M^2}{(\frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot \psi_s)^2}$.

На рис. 2 приведена структурная схема САР скорости горизонтальных валков, которая синтезирована по принципу подчиненного регулирования координат с последовательной коррекцией. На структурной схеме показаны два регулятора тока по осям d–q, которые подчинены внешнему контуру регулирования скорости (момента) электродвигателя. Для получения оптимальных переходных процессов, контура регулирования токов настроены на модульный оптимум. Контур регулирования скорости (момента) кроме контуров регулирования токов по осям d–q еще подчинен контур регулирования потокосцепления обмотки ротора ψ_f . Постоянная времени обмотки возбуждения обозначается T_{d0} , а постоянные времени обмотки статора по осям d–q T_{sd} , T_{sq} . В связи с тем, что на исследуемом объекте не требуется повышенный статизм, то контур регулирования скорости настраивается на модульный оптимум. Для снижения колебательности системы с ростом скорости предусмотрен блок компенсации перекрестных связей по ЭДС вращения СД. Сигнал ω^* формирует заданную скорость рабочих валков.

Рассогласование между заданной скоростью и действительной поступает на вход пропорционального регулятора скорости (П–РС). На выходе П–РС после деления на сигнал задания основного потокосцепления ψ_f^* формируется сигнал задания момента M^* . Регулирование скорости выше номинальной осуществляется ослаблением потокосцепления. Для этого в структурной схеме предусмотрен блок БН 4.

С. Математическое описание двухмассовой системы

В связи с тем, что электромеханическая система валков имеет большое количество распределенных масс, то можно заменить действительную систему обобщенной двухмассовой упругой системой. При этом под моментом инерции первой массы J_1 принимается момент инерции СД, а под моментом инерции второй массы J_2 – момент инерции рабочего вала, сляба и приведенный момент инерции опорного вала к рабочему. Упругость сосредоточена в шпинделе, соединяющего вал СД и рабочий валок. Движение двухмассовой системы можно представить в виде следующей системы уравнения:

$$\begin{cases} M - M_{c1} - M_{12} = J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M_{12} - M_{c2} = J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt}; \\ M_{12} = c_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2); \end{cases} \quad (6)$$

где M – электромагнитный момент двигателя; M_{12} – упругий момент; M_{c1} , M_{c2} – статические моменты; c_{12} – жесткость упругого элемента; φ_1 , φ_2 – перемещения вращательно движущихся элементов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

На разработанной математической модели получены кривые переходных процессов и проведен анализ динамических свойств системы для различных переходных режимов. На рис. 3 и рис. 4 представлены кривые переходных процессов тока статора двигателя и кривые переходных процессов момента и скорости двигателя. Объектом исследования является электромеханическая система на базе синхронного электропривода с основными параметрами: $P_n = 12$ МВт, $U_n = 3$ кВ, $I_{ns} = 2379$ А, $\omega_n = 6,28$ рад/с, $f_{ns} = 10$ Гц, $r_s = 0,00954$ Ом, $T_{d0} = 2,8$ с, $T_{sd} = 1,44$ с, $T_{sq} = 1,26$ с, $J_{ov} = 145000$ кг·м², $J_2 = 59678$ кг·м², $c_{12} = 4,52 \cdot 10^9$ Н·м.

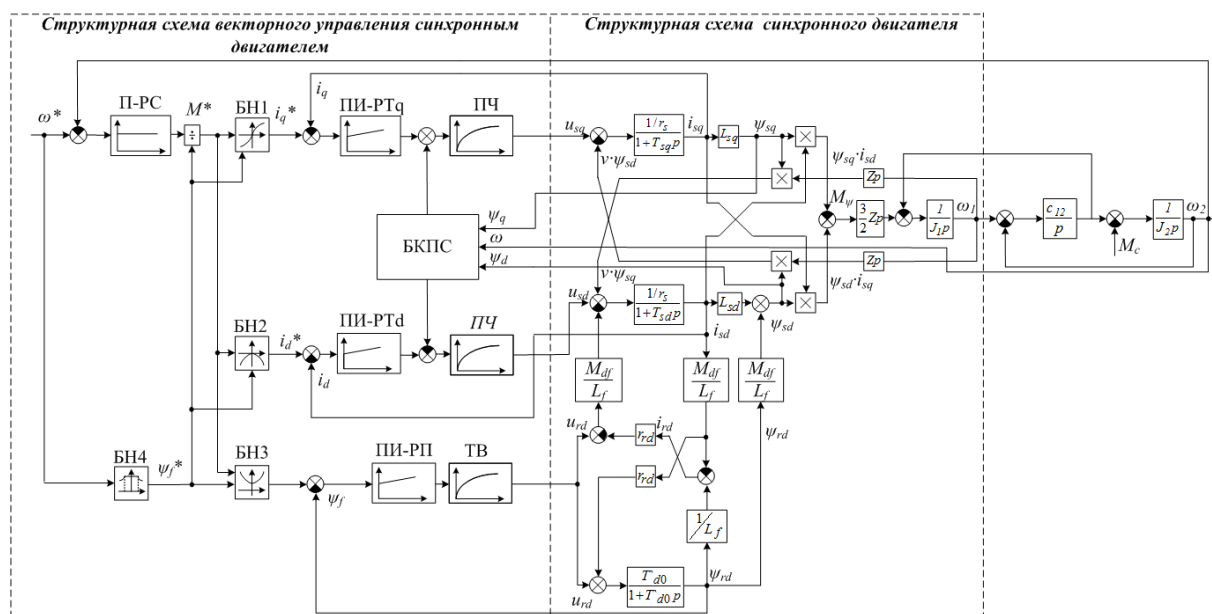


Рис. 2. Структурная схема синхронного электропривода реверсивной прокатной клетки



Рис. 3. Кривые переходных процессов тока статора двигателя

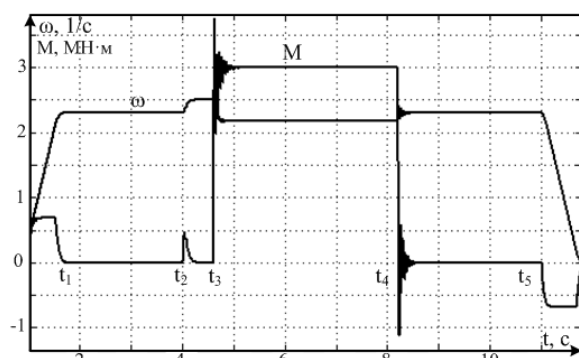


Рис. 4. Кривые переходных процессов скорости и момента двигателя

На рис. 3 и рис. 4 в моменты времени t_0 - t_1 происходит разгон двигателя до установившейся скорости 2,3 рад/с за 0,6 сек. В момент времени t_2 начинается предразгон двигателя до скорости 2,5 рад/с, с целью компенсации статической просадки по скорости при захвате металла валками. В момент наброса нагрузки t_3 возникают

вибрации моментов, которые являются следствием наличия упругого валопровода между двигателем и рабочим валком. При захвате металла перегулирование по моменту достигает величины $\sigma = 23,3\%$, а статическая просадка по скорости равна $\Delta\omega = 0,3$ рад/с. В момент времени t_4 происходит выброс металла валками, а в момент t_5 – торможение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ударное изменение нагрузки, возникающее в электромеханической системе синхронного электропривода реверсивной прокатной клетки, представляет собой сложный динамический процесс, исследование которого целесообразно выполнять методами математического моделирования. Разработанная математическая модель электромеханической системы прокатной клетки позволяет наиболее точно исследовать динамические свойства синхронного электропривода. Достоверное математическое описание позволяет анализировать ударные приложения нагрузки на электромеханическую систему клетки. Это позволит исследовать новые или усовершенствованные алгоритмы управления и адаптировать программу прокатки материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Снижение динамических нагрузок механического и электрического оборудования черновой подгруппы клеток стана горячей прокатки / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, А.А. Радионов, И.Ю. Андрушин, А.Н. Гостев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – № 2. – С. 69–77.

2. Гасияров В.Р. Разработка системы автоматического регулирования формы раската в плане приводов клетки толстолистного стана горячей прокатки: дис. канд. техн. наук. – Магнитогорск, 2012. 125 с.
3. Алгоритм расчета скоростных и нагрузочных режимов электроприводов клеток прокатного стана при прокатке толстых полос / В.В. Галкин, А.С. Карандаев, В.В. Головин, А.А. Радионов, В.Р. Храмшин, В.Р. Гасияров, О.А. Залогин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 3-2. С. 12-17.
4. Исследование энергосиловых параметров прокатки листа на толстолистном стане 5000 ОАО “ММК” / В.Р. Гасияров, О.А. Залогин, А.А. Радионов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – Магнитогорск: МГТУ, 2010. № 2. С. 73-77.
5. Экспериментальное определение положения равнодействующей давления металла на валки на толстолистном стане 5000 / А.А. Радионов, В.Р. Гасияров, Д.Ю. Усатый // Электротехнические системы и комплексы. – Магнитогорск: МГТУ, 2010. Вып. 18. С. 3-6.
6. Разработка уточненной методики расчета момента на валу двигателя клетки толстолистного стана горячей прокатки и проверка ее адекватности / Д.Ю. Усатый, В.Р. Гасияров, А.А. Радионов // Известия вузов. Электромеханика. 2011. № 4, С. 78-81.
7. Совершенствование автоматизированных электроприводов агрегатов прокатного производства / А.С. Карандаев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал – 2014. – № 1. – С. 3–15.
8. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием – М.: АCADEMA, 2006. – 259 с.
9. Слежановский О. В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

